第 37 卷第 14 期
2017 年 7 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.14
Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201604160701

向元彬, 周世兴, 肖永翔,胡庭兴,涂利华,黄从德.降雨量改变对常绿阔叶林干旱和湿润季节土壤呼吸的影响.生态学报,2017,37(14):4734-4742.

Xiang Y B, Zhou S X, Xiao Y X, Hu T X, Tu L H, Huang C D.Effects of precipitation variations on soil respiration in an evergreen broad-leaved forest during dry and wet seasons.Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4734-4742.

降雨量改变对常绿阔叶林干旱和湿润季节土壤呼吸的影响

向元彬, 周世兴, 肖永翔,胡庭兴,涂利华,黄从德*

四川农业大学林学院,四川省林业生态工程省级重点实验室, 成都 611130

摘要:通过野外原位试验,研究降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林干旱和湿润季节土壤呼吸速率的影响。采用 LI-8100 土壤碳通量分析系统(LI-COR Inc., USA)测定干旱和湿润季节对照(CK)、增雨 10%(LA)、增雨 5%(TA)、减雨 10%(LR)、减雨 20%(MR)、减雨 50%(HR) 6 个处理水平的土壤呼吸速率,并通过回归方程分析温度和湿度与土壤呼吸速率间的关系。结果表明:湿润季节土壤呼吸速率高于干旱季节, HR 处理对干旱季节土壤呼吸速率影响较大,而 LA 处理对湿润季节土壤呼吸速率的影响较大。TA 和 LR 处理使土壤呼吸的温度敏感性增加,而 HR、LA 和 MR 处理使土壤呼吸的温度敏感性降低,干旱季节 Q_{10} 值高于湿润季节。各处理湿润季节土壤微生物量碳氮含量显著高于干旱季节,HR、MR 和 LA 处理减少土壤微生物生物量碳、氮的含量,而 TA 和 LR 处理增加土壤微生物生物量碳、氮的含量。与湿润季节相比,干旱季节土壤水分对土壤呼吸速率的影响较大;而与土壤温度相比,土壤水分对土壤呼吸速率的影响较小。在降雨量改变的背景下,华西雨屏区常绿阔叶林无论是干旱还是湿润季节,适当增雨和减雨都会促进土壤呼吸速率,而较高量的增雨和减雨会抑制土壤呼吸速率。

关键词:降雨量改变;常绿阔叶林;土壤呼吸;土壤水分;Q_{10}值

Effects of precipitation variations on soil respiration in an evergreen broad-leaved forest during dry and wet seasons

XIANG Yuanbin, ZHOU Shixing, XIAO Yongxiang, HU Tingxing, TU Lihua, HUANG Congde*

College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Laboratory of Forestry Ecology Engineering, the Provincial Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, *China*

Abstract: Our objective was to explore the effects of precipitation variations on soil respiration and its temperature sensitivity in an evergreen broad-leaved forest during the dry and wet seasons in western China affected by monsoons. Six treatments: CK (a control), LA (low water addition), TA (trace water addition), LR (low water reduction), MR (medium water reduction), and HR (high water reduction) were established in an evergreen broad-leaved forest. The LI-8100 (LI-COR Inc., USA) Automated Soil CO_2 Flux System was used to measure soil respiration rates during the dry (December 2013 to February 2014) and wet (July to September 2014) seasons of the evergreen broad-leaved forest. The results were as follows: the soil respiration rate was higher in the wet than dry season. HR treatment had a greater impact on the soil respiration rate during the dry season, similarly to LA in the wet season. LR and TA treatments increased the temperature sensitivity of soil respiration, whereas LA, MR, and HR decreased the temperature sensitivity of soil respiration, and the Q_{10} value was higher in the wet than in the dry season. HR, MR, and LA treatments decreased the

基金项目:国家"十二五"科技支撑项目(2010BACO1A11);国家自然科学基金项目(31300522)

收稿日期:2016-04-16; **修订日期:**2016-09-01

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: lyyxq100@ aliyun.com

carbon and nitrogen contents in soil microbial biomass, and LR and TA increased the contents of soil microbial biomass carbon and nitrogen. The contents of carbon and nitrogen in microbial biomass in different treatments were significantly higher in the wet than in the dry season. Compared with the wet season, in the dry season, soil moisture had a greater impact on the soil respiration rate; and compared with soil temperature, soil moisture had little effect on the soil respiration rate. Considering that the amount of precipitation varies, appropriate water addition and reduction could promote the soil respiration rate, whereas higher amounts of water addition and reduction could inhibit the soil respiration rate during the dry and wet seasons, respectively, of the evergreen broad-leaved forest in western China.

Key Words: precipitation variation; evergreen broad-leaved forest; soil respiration; soil moisture; Q_{10} value

森林生态系统拥有着巨大的碳库,同时还维持着巨大的土壤碳库[1]。土壤呼吸每年释放的 CO_2 可达到 68—100PgC[2],是仅次于光合作用的第二大陆地碳通量,占生态系统呼吸 60%—90%[3],对大气 CO_2 浓度、陆地生态系统具有重要的作用[4-5]。土壤呼吸非常轻微的变化也会明显的改变大气中 CO_2 浓度[1],在调控区域和全球尺度的碳氮循环上起着关键的作用[6]。因此,研究全球碳循环关键生态过程的土壤呼吸具有十分重要的科学意义。

全球气候变化已成为毋庸置疑的事实[7-8],在全球气候变化的背景下,全球和区域尺度的降水格局产生了深刻的变化[9],引起降雨量增加或减少的不平衡,季节变化较大[10-11],导致北半球中纬度地区降雨量增大,亚热带地区降水量下降,南半球的降水量均增大[12]。降雨是土壤水分最主要的来源,它能改变土壤通气条件,增加土壤湿度,对地表凋落物和土壤有机质分解、土壤酶活性、植物根系、微生物和植被群落结构和功能产生影响,对地下物理生物化学过程具有重要的调控作用[13-15]。降雨量的改变势必会对森林生态系统过程造成重大的影响。所以,推测降雨量的改变可能会影响或改变森林生态系统过程中的土壤碳动态。但目前这一方面的研究还很缺乏。目前,国内外学者展开了一系列模拟降雨对土壤呼吸影响的研究。已有的研究主要集中在干旱和半干旱地区[16-17]、实验室模拟培养[18]以及降雨事件或短期模拟降雨[19-21]等方面,并取得了丰硕的成果,但忽视了不同降水程度对森林生态系统在干旱和湿润季节土壤呼吸速率的影响或改变。另外,由于小尺度区域上降水的不确定性以及干旱和湿润季节森林生态系统的差异性,非常有必要同时进行模拟降雨增加和降雨减少两种情景在干旱和湿润季节研究未来降雨变化对森林生态系统碳循环的影响。

本研究以该区常绿阔叶林为研究对象,设置 6 个不同处理水平的降雨量梯度,通过野外原位试验,研究降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林干旱和湿润季节土壤呼吸的影响,探讨降雨对土壤呼吸过程的影响和内在机制,其结果可为预测未来该区域森林生态系统土壤碳动态对降雨量改变的响应提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于四川省雅安市雨城区碧峰峡(102°90′E, 29°40′N)内,海拔高度为 977.62 m,≥10℃年积温 5231 ℃,年均气温为 16.2 ℃,最冷月为 1 月,平均气温 6.1 ℃,最热月为 7 月,平均气温 25.4 ℃,全年地面均温 18.1 ℃。年日照时数为 1039.6 h,全年太阳辐射总量为 3640.13 MJ/cm^2。无霜期为 304 d,年平均降水量 1706 mm,干旱季节(12 月、1 月和 2 月)平均降雨量占年平均降雨量的 4.22%;湿润季节(7 月、8 月和 9 月)平均降雨量占年平均降雨量的 59.55%。实验区为地带性的偏湿性亚热带常绿阔叶林,属亚热带湿润季风型山地气候。实验区内植物种类丰富,群落结构复杂。主要有木荷(*Schima superba*)、硬斗石栎(*Lithocarpus hancei*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、润楠(*Machilus pingii*)、总状山矾(*Symplocos botryantha*)、柃木(*Eurya japonica*)、青榨槭(*Acer davidii*)、大叶石栎(*Lithocarpus megalophyllus*)、野漆(*Rhus succedanea*)、深裂中华槭(*Acer sinense*)、利川润楠(*Machilus lichuanensis*)、肉桂(*Cinnamomum cassia*)和山茶(*Camellia japonica*)等。土壤类型以黄壤为主,

土壤厚度大于 60 cm,林地条件基本一致。

1.2 试验地设置

2013 年 10 月在实验地内选取未被破坏的、代表性的林地建立 18 个 3 m×3 m 的样方进行编号,每个样方间设>3 m 的缓冲带。试验设置 6 个降雨处理,即对照(CK)、增雨 10%(LA)、增雨 5%(TA)、减雨 10%(LR)、减雨 20%(MR)、减雨 50%(HR),每种处理重复 3 次,共 18 个处理。按试验区近年来平均降雨量为 1706mm 计算,增加 10%、5%的降雨量为每年增加 170.6 mm 和 85.3 mm 的降雨量;减雨使用自制的减雨架进行模拟减雨,减雨架遮挡面积为减雨样方面积的 10%、20%、50%。各处理样方四周用 PVC 板材围起,将 PVC 板插入地面 15 cm,用于阻止地表径流的流入,但不影响深层土壤的水分交流。减雨架上端离地 120—140 cm 处,用 5cm 宽的瓦面状透明 PVC 板凹槽搭建相应面积的挡雨面,并均匀分布在减雨架上面,形成减雨处理。增雨用喷雾器在林地样方 50 cm 高度来回均匀喷洒相应的清水量,从 2013 年 11 月 10 日起到 2014 年 9 月 10 日,每 15 d 进行 1 次处理,用手提式喷雾器在林地样方 50 cm 高度来回均匀喷洒,形成增雨处理。

1.3 土壤呼吸速率、温度、湿度及微生物碳氮的测定

(1)土壤呼吸速率测定 2013 年 10 月在每个样方内随机安置 3 个 PVC 连接环,用于土壤呼吸速率的定期测定。试验期为干旱季节(2013 年 12 月、2014 年 1 月、2 月)和湿润季节(2014 年 7 月、8 月、9 月)。在这期间每月下旬选择测定前 3d 无降雨,并且天气晴朗的 1 d 测定土壤呼吸速率。土壤呼吸速率的测定采用开路式 CO_2通量测量系统 LI-8100(LI-COR, Lincoln, NE, USA),测定时间为 9:00—18:00,每间隔 3h 测定 1 次,共测定 4 次,以平均值作为该月土壤呼吸速率平均值[22-23]。

(2)土壤温度和湿度测定 在测定土壤呼吸的同时测定 0—10 cm 土壤温度和体积含水量。土壤温度采用 Li-8100 自带温度探头测定;土壤体积含水量使用时域反射仪测定。

(3)土壤微生物碳氮测定 2014 年 2 月和 2015 年 8 月在样方内取土样,取样时在样方内随机设 5 个土壤采集样点,用 100 cm^3环刀在 0—20 cm 土层取样,每个样方内所采集的土样混合均匀组成一个混合土样,并采用氯仿熏蒸提取法测定微生物生物量碳、氮含量[22, 24]。

1.4 数据处理

土壤呼吸速率与土壤温度的单因素指数模型为 $R_S = ae^{bt}$,式中 R_S为土壤呼吸速率(μmol $m^{-2}s^{-1}$),t 为土壤温度(℃),a 为 t=0℃时的土壤呼吸速率,b 为温度反应系数。

土壤呼吸速率与土壤湿度的单因素模型为一元二次项方程 $Rs = aW^2 + bW + c$,式中 W 为土壤体积含水量,a、b、c 为常数。

Q_{10}值计算方法为 $Q_{10} = e^{10b}$,式中 b 是土壤呼吸与土壤温度指数模型中温度反应常数。

利用 Microsoft Excel 2003 完成数据统计分析及图表生成,然后用 LSD 进行多重比较不同处理间土壤呼吸速率、土壤微生物生物量碳氮的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 降雨量改变对干旱和湿润季节土壤呼吸速率的影响

由图 1 可知,土壤呼吸速率在旱季和湿润季节差异较大。干旱季节土壤呼吸速率较低,LA、TA、CK、LR、MR 和 HR 土壤呼吸平均速率分别为:0.57、0.80、0.76、0.90、0.68 μmol $m^{-2}s^{-1}$和 0.56 μmol $m^{-2}s^{-1}$,HR 对土壤呼吸的抑制作用最强,LR 对土壤呼吸的促进作用最强;湿润季节土壤呼吸速率较高,土壤呼吸平均速率分别为:1.81、2.40、2.19、2.60、2.17 μmol $m^{-2}s^{-1}$和 2.02 μmol $m^{-2}s^{-1}$,LA 对土壤呼吸速率的抑制作用最强,LR 对土壤呼吸速率的促进作用最强。试验期间,MR、HR 与 LR、LA 与 CK 土壤呼吸速率差异显著($P<0.05$), LA、MR 和 HR 处理降低了土壤呼吸速率,TA 和 LR 处理促进了土壤呼吸速率。

2.2 降雨对干旱和湿润季节土壤呼吸速率增长率的影响

由图 2 可以看出,干旱季节和湿润季节 TA 和 LR 处理土壤呼吸速率表现为正增长,而 LA、MR 和 HR 均

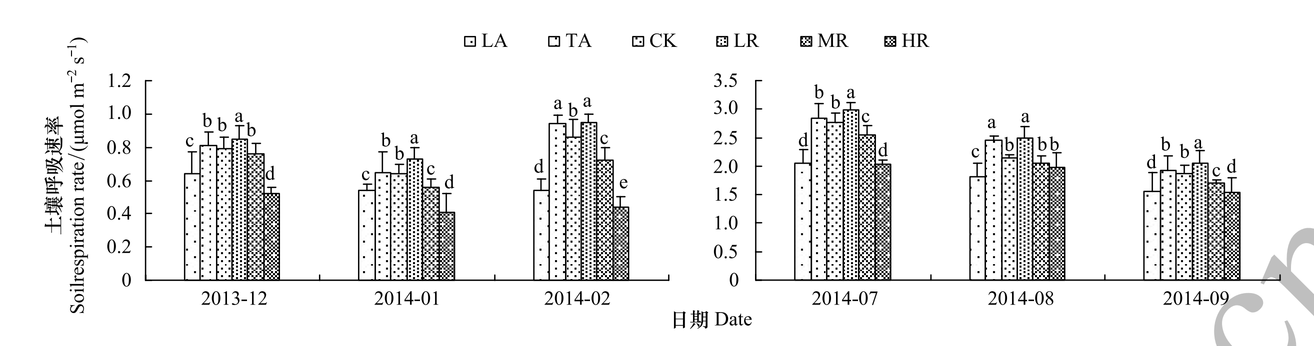


图 1 干旱和湿润季节各处理的土壤呼吸速率月动态

Fig.1 Monthly dynamic of soil respiration rate in different treatments during the dry and wet season

CK 代表对照处理,N 代表氮沉降处理,R 代表减雨处理,A 代表增雨处理,NR 代表氮沉降+减雨处理,NA 代表氮沉降+增雨处理;不同字母表示差异显著(P<0.05)

表现为负增长。干旱季节,LA、TA、LR、MR 和 HR 对土壤呼吸速率的增长率分别为-24.89%、4.80%、18.34%、-10.48%和-27.07%。湿润季节,LA、TA、LR、MR 和 HR 对土壤呼吸速率的增长率分别为-17.48%、9.57%、18.31%、-1.06%和-8.13%。这表明,HR 处理对干旱季节土壤呼吸速率影响较大,LA 处理对湿润季节土壤呼吸速率的影响较大。

2.3 降雨量改变对干旱和湿润季节土壤呼吸温度敏感性的影响

采用指数模型 $Rs=ae^{bt}$ 拟合土壤呼吸与土壤温度的关系(图 3—图 4),得出土壤呼吸与温度存在显著指数正相关关系(P<0.01)。方程拟合结果表明,旱季可解释土壤呼吸速率月动态变化的 58.32%—87.86%,LA、TA、CK、LR、MR 和 HR 处理土壤呼吸速率的 Q_{10} 值分别为2.41、2.94、2.81、3.16、2.65 和 2.17。湿润季节可解释土壤呼吸速率月动态变化的 61.15%—78.64%,LA、TA、CK、LR、MR 和 HR 处理土壤呼吸速率的 Q_{10} 值分别为 1.93、2.84、2.43、3.01、2.31 和 2.12。表明 TA 和 LR 增加了土壤呼吸的温度敏感性,而 HR、LA 和 MR 降低了土壤呼吸的呼吸的温度敏感性;同一处理干旱季节 Q_{10} 值高于湿润季节。

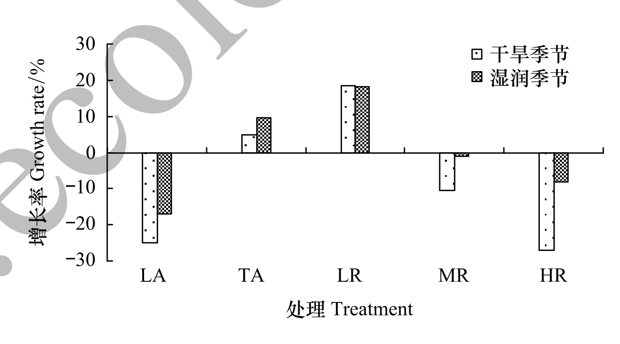


图 2 各处理土壤呼吸速率的增长率

Fig. 2 Growth rate of soil respiration rate in each treatment during the dry and wet season

2.4 土壤水分对干旱和湿润季节土壤呼吸速率的影响

由图 5 可知,各处理随着降水量的减少,土壤体积含水量减少,干旱季节常绿阔叶林土壤体积含水量平均值为 25.66%,而湿润季节平均值为 31.09%。由于土壤呼吸速率和土壤含水量的一元二次函数模型优于其他函数模型,能更好的说明土壤含水量对土壤呼吸速率实时变化[25]。故本研究采用一元二次函数模型进行回归分析(表 1),一元二次项方程可解释湿润季节各处理土壤呼吸速率月动态变化的 34.75%—55.78%;解释干旱季节各处理土壤呼吸速率月动态变化的 46.94%—63.12%。这表明,与湿润季节相比,干旱季节土壤水分对土壤呼吸速率的影响较大;而与土壤温度相比,土壤水分对土壤呼吸速率的影响较小。

2.5 土壤微生物量碳氮含量及其与土壤呼吸速率的关系

湿润季节,各处理土壤微生物生物量 C、N 含量范围分别为 567.06—683.45 mg/kg 和 45.66—62.25 mg/kg。干旱季节,各处理土壤微生物生物量 C、N 含量范围分别为 465.24—613.74 mg/kg 和 38.46—54.13 mg/kg。各处理湿润季节土壤微生物量碳氮含量显著高于干旱季节(P<0.05)。试验期间,HR、MR 和 LA 处理减少了土壤微生物生物量碳、氮的含量,TA 和 LR 增加了土壤微生物生物量碳、氮的含量。干旱季节与湿润季节各处理土壤微生物生物量 C、N 差异达到显著水平(P<0.05)。回归分析发现,土壤呼吸速率与微生物碳氮

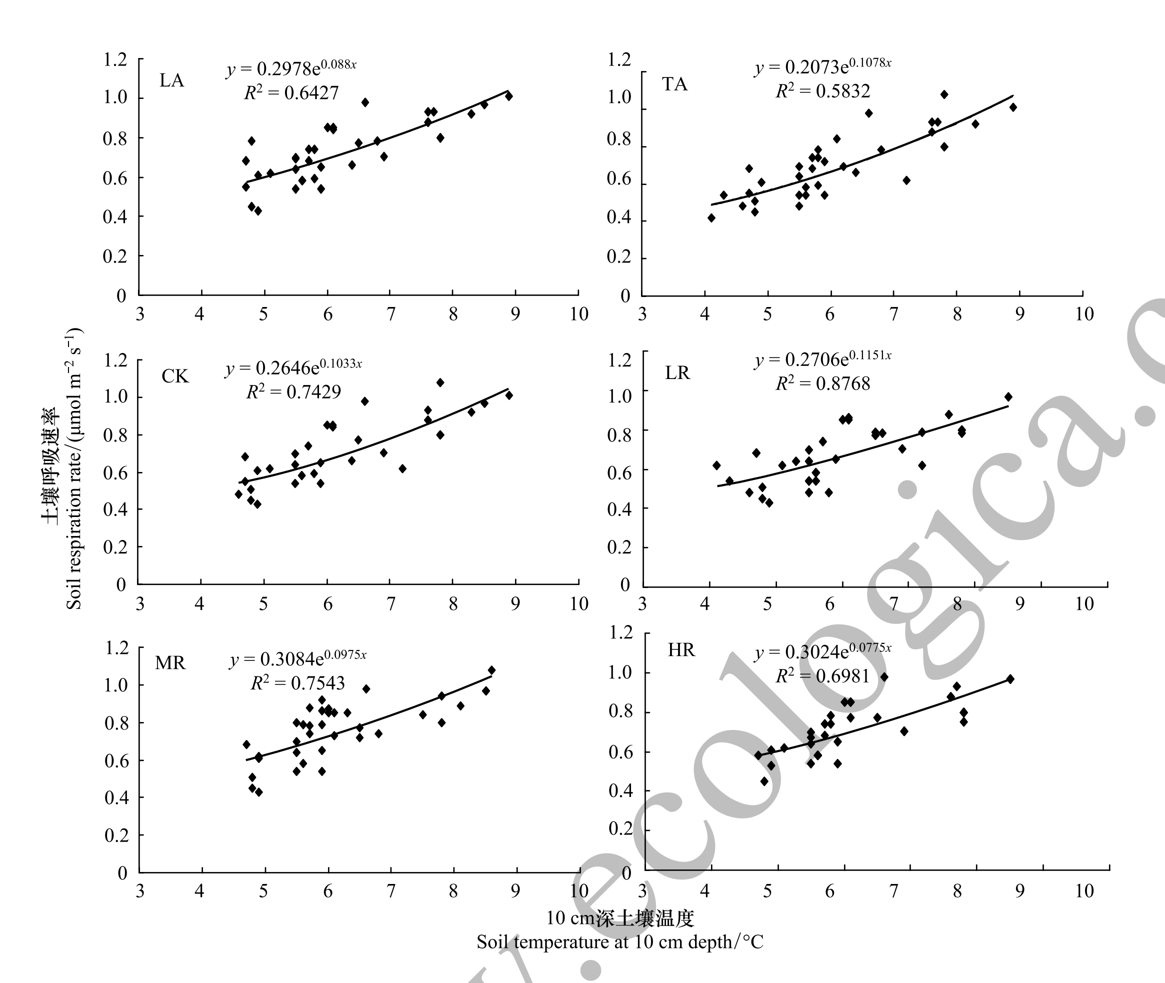


图 3 干旱季节各处理土壤呼吸速率与 10 cm 深土壤温度的关系

Fig.3 Relationship of soil respiration rate and soil temperature at 10 cm depth in different treatments during the dry season

均呈现显著线性正相关关系($P<0.05$)。

表 1 土壤呼吸速率与 10cm 土壤湿度一元二次函数模型参数

Table 1 Parameters of correlation model between soil respiration rate and soil moisture at 10 cm depth

处理 Treatment	干旱季节 The dry season $Rs=aW^2+bW+c$				湿润季节 The wet season $Rs=aW^2+bW+c$			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
LA	0.0212	−1.0295	13.4300	0.6730	0.1589	−2.9970	−2.9700	0.6007
TA	0.0115	−0.5221	6.6969	0.6135	0.1307	−2.4111	−2.4111	0.5287
CK	−0.0026	0.2825	−3.7623	0.8476	0.1465	−2.0179	−2.0179	0.7854
LR	0.0122	−0.5957	8.0633	0.5748	0.1185	−2.274	−2.2740	0.5279
MR	0.0083	−0.3272	4.1935	0.4523	0.1050	−1.3356	−1.3356	0.4367
HR	−0.0047	0.4003	−6.5443	0.4384	0.1310	−2.7533	−2.7533	0.4365

CK 代表对照处理,N 代表氮沉降处理,R 代表减雨处理,A 代表增雨处理,NR 代表氮沉降+减雨处理,NA 代表氮沉降+增雨处理

3 讨论

3.1 干旱和湿润季节土壤呼吸速率对降雨量改变的响应

降雨不仅是土壤水分的主要来源,而且直接和间接地影响着土壤中植物根系、微生物以及土壤动物的生命代谢活动,从而对土壤呼吸产生影响[13, 25]。土壤呼吸的高低与自身的水分状况密切相关[26]。有研究表明,土壤呼吸速率在干燥条件下较低,在中等含水量下时较大,而在含水量较高或较低时土壤呼吸速率又会下

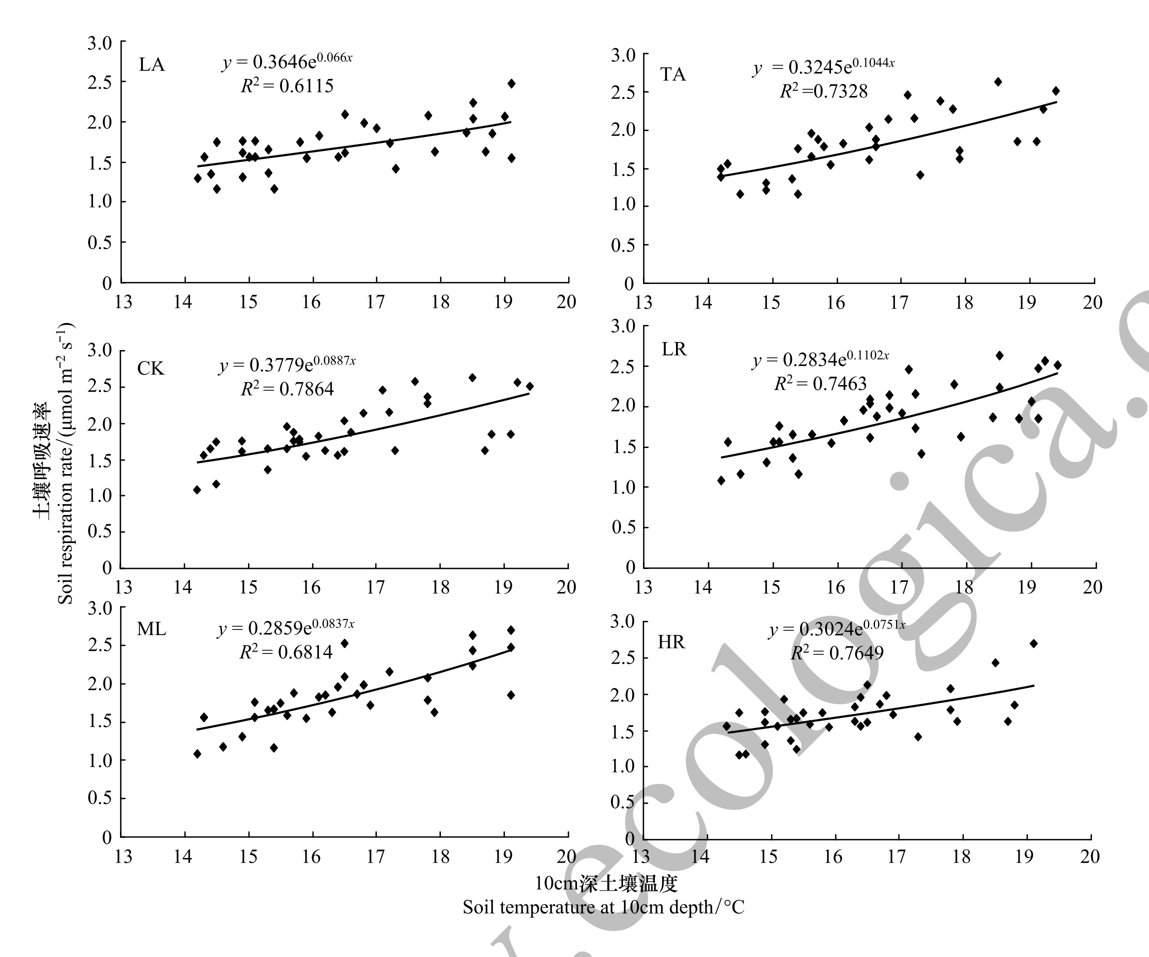


图 4　湿润季节各处理土壤呼吸速率与 10 cm 深土壤温度的关系

Fig.4　Relationship of soil respiration rate and soil temperature at 10 cm depth in different treatments during the wet season

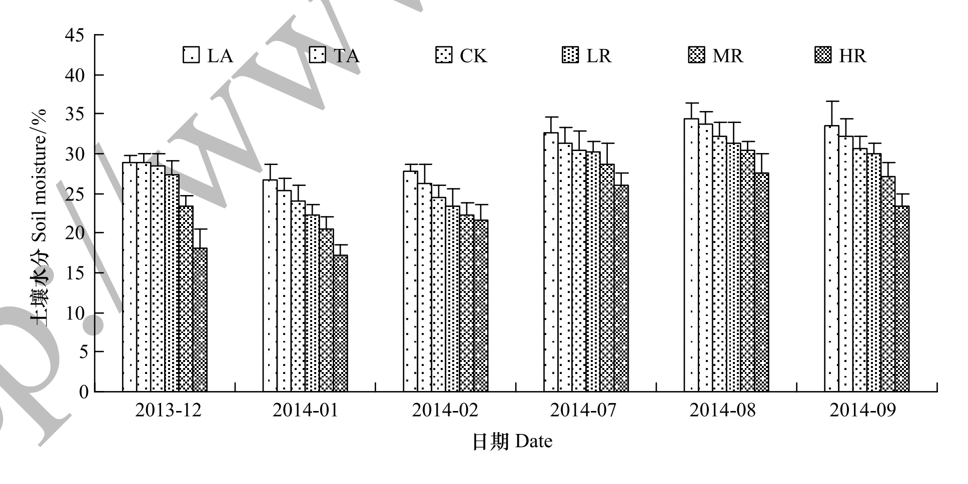


图 5　干旱和湿润季节土壤含水量的月变化

Fig.5　Monthly variation of soil moisture during the dry and wet season

降[6, 27]。李寅龙等[28]研究表明,短花针茅草原的整个生长季,降雨增加 30%处理显著增加土壤呼吸速率($P<0.05$)。Hanson 等[29]在美国田纳西州的研究表明,雨量增加没有显著影响土壤总呼吸。而李会杰等[30]对华北土石山区侧柏土壤呼吸研究表明,5、10mm 和 20mm 降雨增加处理对侧柏林土壤呼吸都有促进作用,而 50mm 降雨增加处理表现出一定的抑制作用。本研究表明,试验期间 LA 处理降低了土壤呼吸速率,TA 处理促进了土壤呼吸速率。LA 和 TA 同为模拟降雨增加处理,但对土壤呼吸的影响却不同。原因可能是降雨会

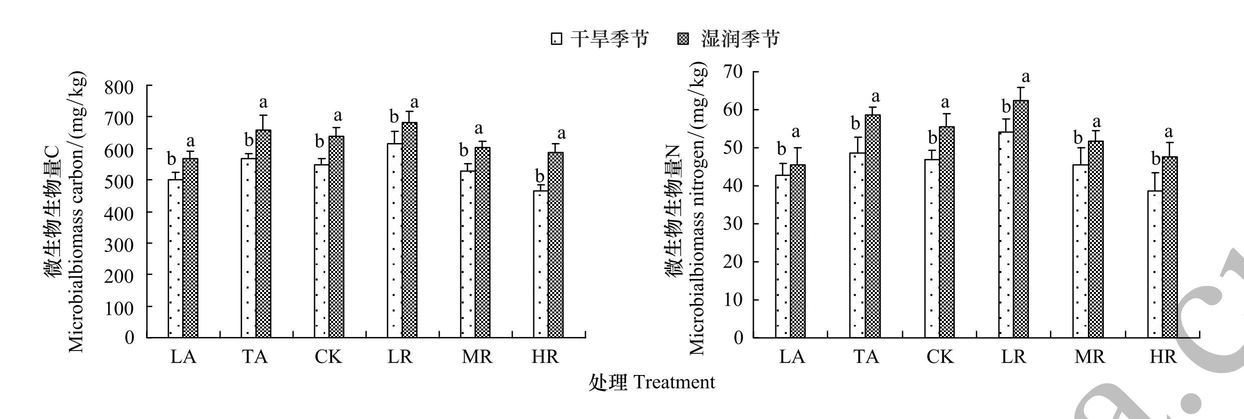


图 6 干旱和湿润季节各处理微生物生物量 C、N

Fig.6 Microbial biomass carbon and nitrogen in different treatments during the dry and wet season

不同字母表示差异显著(P<0.05)

导致土壤水分增加对土壤呼吸产生激发作用,使土壤呼吸增加,但随着降雨量的增加,土壤含水量继续升高会造成土壤孔隙堵塞,影响微生物和植物根系与氧气接触,导致土壤呼吸受到抑制[6, 31-32]。本研究还表明,HR 和 MR 处理降低了土壤呼吸速率,而 LR 处理促进了土壤呼吸速率。在美国堪萨斯州 Konza 草原人工控制降雨量试验表明,降雨减少 30%使土壤呼吸降低了 13%[33],而任艳林等[6]对樟子松人工林用减雨 30%、增雨 30%和对照 3 种穿透雨处理来模拟长期的降雨变化情景的研究发现,土壤呼吸速率平均值大小为对照<减雨 30%<增雨 30%。原因可能是降雨量减少会使土壤水分含量减小,土壤孔隙度增高,有利于土壤呼吸,但随着降雨量的减少,土壤含水量继续降低会使根呼吸和土壤异养呼吸降低,凋落物和地下有机质分解减慢,导致土壤呼吸表现为下降[30, 34]。

通常降雨能促进干燥土壤的呼吸作用,而抑制潮湿土壤的呼吸作用[26]。在干旱条件下,土壤水分是土壤呼吸季节和年际变化的主要驱动因子[6]。本研究发现,在干旱季节,LA、TA、LR、MR 和 HR 对土壤呼吸速率的增长率分别为-24.89%、4.80%、18.34%、-10.48%和-27.07%;湿润季节,LA、TA、LR、MR 和 HR 对土壤呼吸速率的增长率分别为-17.48%、9.57%、18.31%、-1.06%和-8.13%。HR 处理对干旱季节土壤呼吸速率影响较大,LA 处理对湿润季节土壤呼吸速率的影响较大。与美国怀俄明州草原、澳大利亚昆士兰州热带森林和内蒙古多伦草原等地区开展的模拟和野外试验结果类似[17, 35-36]。而且土壤温度与水分对土壤呼吸的影响存在交互作用,同样的热量进入不同含水量的土壤时,减雨处理的含水量低温度较高,增雨处理的含水量高温度较低,使表观土壤呼吸速率高于或低于对照[6]。可见,降雨对土壤呼吸的影响是一个极其复杂的过程。

微生物呼吸是土壤呼吸的重要组成部分,不同生态系统其在土壤总呼吸中所占比例相差较大,约为 30%—90%[18]。Treseder 等[37]对微生物对施氮响应的研究中表明,土壤呼吸速率与土壤微生物生物量存在显著正相关关系,土壤微生物生物量 C、N 在一定程度上反映土壤中微生物数量和活性。本研究表明,各处理湿润季节土壤微生物量碳氮含量显著高于干旱季节,HR、MR 和 LA 处理减少土壤微生物生物量碳、氮的含量,TA 和 LR 增加了土壤微生物生物量碳、氮的含量。这可能是模拟降雨会改变了植物根系生物量、微生物的繁殖速度以及活性、土壤水势和微生物对底物的利用,从而改变了土壤微生物生物量 C、N 含量,进而影响有机质的分解速率和微生物呼吸,导致处理间的土壤呼吸速率不同[23-24, 38]。

3.2 干旱和湿润季节土壤呼吸速率及其温度敏感性对降雨格局改变的响应

温度是调节和控制生物化学过程的关键因素[39-40]。土壤呼吸的温度敏感性很大程度上影响土壤 CO_2的释放量[41],而且土壤水分与土壤温度相互作用会直接或间接影响土壤呼吸的温度敏感性。本研究采用指数模型 $Rs = ae^{bt}$拟合土壤呼吸与土壤温度的关系,得出土壤呼吸与温度存在显著指数正相关关系(P<0.01),计算得出的 Q_{10}值表明 LA 和 LR 增加了土壤呼吸的温度敏感性,而 HR、MA 和 MR 降低了土壤呼吸的温度敏感性。原因可能是华西雨屏区常绿阔叶林地下微生物、植物根系、土壤动物的代谢作用受到了降雨和温度的刺

激而影响了土壤呼吸速率,改变了 Q_{10}值。研究还表明,常绿阔叶林各处理在干旱季节的 Q_{10}值范围为 2.17—3.16,而湿润季节 Q_{10}值范围为 1.86—3.01,同一处理干旱季节 Q_{10}值高于湿润季节。与 Dörr 等[42]研究的在湿润年份 Q_{10}值较低,而在干旱年较高的结果一致。

土壤水分是影响土壤呼吸速率的一个重要因素[4, 43-44]。有研究表明,土壤呼吸与温度呈极显著相关性,但与土壤湿度的相关性较差[23, 45-46]。本研究发现,一元二次项方程可解释干旱季节各处理土壤呼吸速率月动态变化的 46.94%—63.12%,解释湿润季节各处理土壤呼吸速率月动态变化的 34.75%—55.78%,解释程度低于土壤温度对土壤呼吸的解释。这表明,与湿润季节相比,干旱季节土壤水分对土壤呼吸速率的影响较大;而与土壤温度相比,土壤水分对土壤呼吸速率的影响较小。

由此可见,模拟降雨对华西雨屏区常绿阔叶林干旱和湿润季节土壤呼吸速率产生了显著的影响。土壤呼吸受到很多生物和非生物因子的影响,如森林类型、土壤微生物、养分、根系、土壤温度和土壤水分等等,而这些因子是相互作用的,共同作用于土壤呼吸。其影响机制非常复杂,而本研究只针对了模拟降雨对干旱和湿润季节土壤呼吸的影响,而且试验时间较短,要全面评价降雨对森林土壤呼吸速率的影响还需进一步长期深入地研究。

参考文献(References):

[1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.

[2] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, Newkirk K, Lux H, Bowles F P, Catricala C, Magill A, Ahrens T, Morrisseau S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. Science, 2002, 298(5601): 2173-2176.

[3] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. Nature, 2010, 464(7288): 579-582.

[4] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus B, 1992, 44(2): 81-99.

[5] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine. Tree Physiology, 2003, 23(4): 273-280.

[6] 任艳林, 杜恩在. 降水变化对樟子松人工林土壤呼吸速率及其表观温度敏感性 Q_{10}的影响. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(6): 933-941.

[7] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. Science, 2004, 306(5702): 1686-1686.

[8] 陈亚梅, 和润莲, 邓长春, 刘洋, 杨万勤, 张健. 川西高山林线交错带凋落物纤维素分解酶活性研究. 植物生态学报, 2014, 38(4): 334-342.

[9] IPCC. Summary For Policymakers // Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

[10] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[11] 张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响. 地理科学, 1998, 18(5): 463-471.

[12] 王冀, 娄德君, 曲金华, 张凯. IPCC-AR4 模式资料对东北地区气候及可利用水资源的预估研究. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1647-1656.

[13] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta D A, Schaeffer S M. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 221-235.

[14] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(2): 302-311.

[15] Xiang S R, Doyle A, Holden P A, Schimel J P. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(9): 2281-2289.

[16] Asensio D, Peñuelas J, Llusià J, Ogaya R, Filella I. Interannual and interseasonal soil CO_2 efflux and VOC exchange rates in a Mediterranean holm oak forest in response to experimental drought. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(10): 2471-2484.

[17] Norton U, Mosier A R, Morgan J A, Derner J D, Ingram L J, Stahl P D. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(6): 1421-1431.

[18] 邓东周, 范志平, 王红, 孙学凯, 高俊刚, 曾德慧, 张新厚. 土壤水分对土壤呼吸的影响. 林业科学研究, 2009, 22(5): 722-727.

[19] Reichstein M, Rey A, Freibauer A, Tenhunen J, Valentini R, Banza J, Casals P, Cheng Y F, Grünzweig J M, Irvine J, Joffre R, Law B E, Loustau D, Miglietta F, Oechel W, Ourcival J M, Pereira J S, Peressotti A, Ponti F, Qi Y, Rambal S, Rayment M, Romanya J, Rossi F,

Tedeschi V, Tirone G, Xu M, Yakir D. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(4), doi: 10.1029/2003GB002035.

[20] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹, 王艳芬, 张焱, 熊小刚, 陈世苹, 张丽霞, 高英志, 唐芳, 杨晶, 董云社. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. 生态学报, 2004, 24(4): 831-836.

[21] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 赵锐锋, 花永辉. 准噶尔盆地两种荒漠群落土壤呼吸速率对人工降水的响应. 生态学报, 2009, 29(6): 2819-2826.

[22] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 植物生态学报, 2009, 33(4): 728-738.

[23] 向元彬, 黄从德, 胡庭兴, 涂利华, 杨万勤, 李仁洪, 胡畅. 华西雨屏区巨桉人工林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 林业科学, 2014, 50(1): 21-26.

[24] 向元彬, 胡庭兴, 张健, 涂利华, 李仁洪, 雒守华, 黄立华, 戴洪忠. 华西雨屏区不同密度巨桉人工林土壤呼吸特征. 自然资源学报, 2011, 26(1): 79-88.

[25] 褚建民, 王琼, 范志平, 李法云, 孙学凯. 水分条件和冻融循环对科尔沁沙地不同土地利用方式土壤呼吸的影响. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1399-1404.

[26] 王义东, 王辉民, 马泽清, 李庆康, 施蕾蕾, 徐飞. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. 植物生态学报, 2010, 34(5): 601-610.

[27] 朱梦洵, 饶良懿, 李会杰, 苏赛. 侧柏林土壤呼吸速率对不同模拟降雨量的响应. 水土保持通报, 2014, 34(2): 95-99.

[28] 李寅龙, 红梅, 白文明, 韩国栋, 王海明, 周萌. 水、氮控制对短花针茅草原土壤呼吸的影响. 生态学报, 2015, 35(6): 1727-1733.

[29] Hanson P J, O'Neill E G, Chambers M L S, Riggs J S, Joslin J D, Wolfe M H. Soil respiration and litter decomposition // Hanson P J, Wullschleger S D, eds. North American Temperate Deciduous Forest Responses to Changing Precipitation Regimes. New York: Springer, 2003: 163-189.

[30] 李会杰, 饶良懿, 宋丹丹, 陈达, 杨雪, 赵冰清. 降雨对华北土石山区侧柏林土壤呼吸的影响. 环境科学与技术, 2013, 36(9): 1-6.

[31] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO_2 efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. Global Change Biology, 2001, 7(6): 667-677.

[32] Liu X Z, Wan S Q, Su B, Hui D F, Luo Y Q. Response of soil CO_2 efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. Plant and Soil, 2002, 240(2): 213-223.

[33] Harper C W, Blair J M, Fay P A, Knapp A K, Carlisle J D. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO_2 flux in a grassland ecosystem. Global Change Biology, 2005, 11(2): 322-334.

[34] Chang S C, Tseng K H, Hsia Y J, Wang C P, Wu J T. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(5): 788-798.

[35] Holt J A, Hodgen M J, Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North-Queensland. Australian Journal of Soil Research, 1990, 28(5): 737-745.

[36] Chen S P, Lin G H, Huang J H, Jenerette G D. Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe. Global Change Biology, 2009, 15(10): 2450-2461.

[37] Treseder K K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies. Ecology Letters, 2008, 11(10): 1111-1120.

[38] 高强, 马明睿, 韩华, 张维砚, 王昊彬, 郑泽梅, 由文辉. 去除和添加凋落物对木荷林土壤呼吸的短期影响. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1189-1197.

[39] Tu L H, Hu T X, Zhang J, Li X W, Hu H L, Liu L, Xiao Y L. Nitrogen addition stimulates different components of soil respiration in a subtropical bamboo ecosystem. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58: 255-264.

[40] 张一平, 武传胜, 梁乃申, 沙丽清, 罗鑫, 刘玉洪. 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤温度时空分布对模拟增温的响应. 生态学杂志, 2015, 34(2): 347-351.

[41] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivityof soil respiration. Nature, 1998, 396(6711): 570-572.

[42] Dörr H, Münnich K O. Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperate zone. Tellus B, 1987, 39(1/2): 114-121.

[43] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 刘勤. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素. 生态学报, 2010, 30(11): 2919-2924.

[44] Tang X L, Fan S H, Qi L H, Guan F Y, Cai C J, Du M Y. Soil respiration and carbon balance in a Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* (Carr.) Mitford *cv. Pubescens*) forest in subtropical China. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2015, 8(5): 606-614.

[45] 雒守华, 胡庭兴, 张健, 戴洪忠, 涂利华, 李仁洪, 黄立华. 华西雨屏区光皮桦林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1834-1839.

[46] 刘霞, 胡海清, 李为海, 孙程坤, 黄超, 赵希宽, 孙龙. 寒温带岛状林沼泽土壤呼吸速率和季节变化. 生态学报, 2014, 34(24): 7356-7364.